

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-155-06

基于决策树算法的冷冻水系统优化运行研究

刘守亚¹ 袁中原¹ 高波² 倪吉²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 四川省建筑科学研究院有限公司 成都 610000)

【摘要】 以四川省成都市某办公建筑空气源热泵中央空调系统为研究对象, 针对冷冻水系统制定夏季供冷工况下变冷冻水供水温度与变冷冻水流量相耦合的优化运行策略。首先依据运行数据确定出建筑负荷的主要影响因素; 其次结合影响因素依据建筑负荷建立决策树算法, 将系统运行工况分为7类; 最后整理出每种分类工况下空调系统能效 COP_{sys} 的分布情况, 并以 COP_{sys} 最高时对应的冷冻水供水温度和冷冻水泵设定频率作为该工况下最佳设定参数。结果表明: 以上一年度的运行条件为基准, 使用该运行策略在保证室内环境舒适度要求的前提下, 夏季可以节约33%左右的电量, 有效提升了中央空调系统的运行效率。

【关键词】 空气源热泵; 中央空调系统; 优化运行; 决策树算法

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Research on the Optimized Operation of Chilled Water System Based on Decision Tree Algorithm

Liu Shouya¹ Yuan Zhongyuan¹ Gao Bo² Ni Ji²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu, 610000)

【Abstract】 This paper took the air source heat pump central air-conditioning system of an office building in Chengdu, Sichuan Province, as the research object and formulated the optimized operation strategy of coupling the variable chilled water supply temperature with the variable chilled water flow under the cooling condition in summer. Firstly, according to the operating data, the paper determined the main influencing factors of building load. Secondly, based on the influence factors, a decision tree algorithm was established to divide the system's operating conditions into seven categories. Finally, the distribution of COP_{sys} energy efficiency of the air conditioning system under each classification condition was sorted out. Meanwhile, the chilled water supply temperature corresponding to the highest COP_{sys} and the set frequency of the chilled water pump were taken as the best setting parameters under this condition. The results showed that, based on the operating conditions of the previous year, using this operation strategy can save about 33% of the electricity in summer under the premise of ensuring the indoor environment comfort requirements and effectively improving the operating efficiency of the central air conditioning system.

【Keywords】 Air source heat pump; Central air-conditioning system; Optimized operation; Decision tree algorithm

0 引言

中国建筑行业占据了能源消费总量的1/3以上^[1,2], 其中在建筑运行期间, 中央空调系统能耗

占比最高, 约占建筑总能耗的40—60%左右^[3,4]。

近年来随着我国全面步入小康社会, 人们对于室内热舒适度的要求逐渐提高, 这将会导致中央空调系

作者简介: 刘守亚 (2000.01-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 2835767577@qq.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-22

统能耗占比将会更大^[5], 给实现“碳达峰、碳中和”的目标带来了极大挑战。因此如何降低空调系统运行能耗, 提高运行效率成为当下暖通工程中亟待解决的问题。

冷冻水系统的优化运行是提高中央空调系统运行效率的重要手段。相关的研究表明, 通过变水温实验对主机运行性能进行分析, 发现夏季冷冻水供水温度每升高 1℃, 空调主机 COP 可升高 2%—4%^[6-8], 可以有效提高空调系统运行能效。此外水泵变频器的广泛应用为变冷冻水量运行提供了技术条件, 系统可以通过变频器调整水泵频率调整冷冻水流量, 达到节能的目的^[9,10]。

但是冷冻水供水温度和冷冻水泵频率的变化均会影响到室内末端的送风温度、送风焓值以及相对湿度, 提高冷冻水供水温度或降低水泵频率后, 冷冻水与末端盘管的换热能力会降低, 引起室内舒适度不满足要求^[11,12]。此外文献^[13]指出, 水泵频率的变化对主机能耗也有影响, 降低水泵频率时, 冷冻水量减少, 冷冻水与主机之间的换热能力减弱, 反而会降低空调系统的运行能效。因此, 如何

设定冷冻水供水温度与水泵频率的运行组合, 在满足室内环境舒适度要求的同时, 使空调系统处于较高的运行能效状态成为了关键。多数学者通过建立空调冷冻水系统各设备能耗模型, 使用优化算法对供水温度和水泵频率进行求解^[14,15], 但是空调系统各设备之间耦合性复杂, 容易导致模型精度较低, 引起优化效果不理想甚至出现室内舒适性不满足要求的现象。

针对上述问题, 本研究从实际工程出发, 以四川省成都市某办公建筑中央空调系统为研究对象, 依据实际运行数据, 建立系统运行工况分类模型, 制定出冷冻水系统变水温与变水量相耦合的运行策略。

1 系统概述及数据采集

1.1 系统组成

本文以四川省成都市某办公建筑为例进行研究, 该建筑共 13 层, 其中 1F 为大厅, 2F—13F 主要为办公区、会议室等, 总建筑面积 15495m², 采用空气源热泵系统进行集中供冷, 具体参数表 1 所示。

表 1 空调系统设备参数

Table 1 Parameters of air-conditioning system equipment

设备名称	设备数量/台	额定制冷量/(kW/台)	额定制冷功率/(kW/台)	额定扬程/(mH ₂ O)	额定流量/(m ³ /h)
空气源热泵	12	130/132	38.8/39.2	—	—
冷冻水泵	3	—	15	32	100

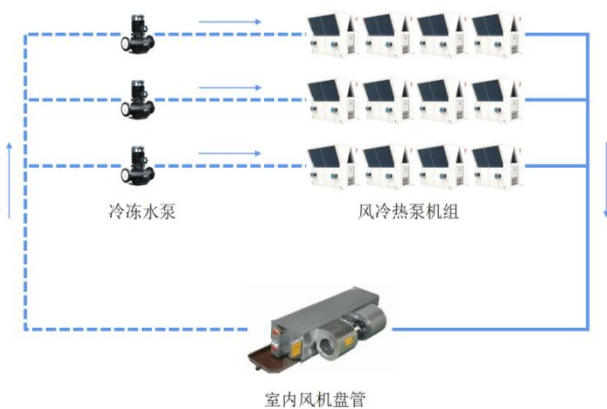


图 1 空调系统运行流程

Fig.1 The operation process of air-conditioning system

该建筑中央空调水系统流程图如图 1 所示, 其中, 冷热源设备由 12 台空气源热泵模块机组成, 3 台冷冻水泵并联运行, 末端采用风机盘管与室内换

热。实际运行的大部分时间内仅需开启两列 8 台主机和 2 台水泵, 因此本研究主要针对该运行情况下的冷冻水设定温度和水泵频率进行优化, 优化前冷冻水供水温度保持 10℃, 水泵设定频率保持 40Hz 运行。

1.2 数据采集

为了获取中央空调系统运行数据, 在冷冻水供、回水管上安装温度计以及超声波流量计以获取供、回水温度和流量; 在主机和水泵配电箱中安装电能质量分析仪获取主机、水泵以及空调末端运行能耗; 并且在室外侧和室内侧安装温湿度记录仪, 分别记录室外环境温湿度和室内温湿度变化情况, 上述每种参数均以 5min 为间隔进行记录。同时结合室内工作人员投诉记录判定室内热舒适是否符合标准。



图 2 实验仪器

Fig.2 Laboratory instruments

通过获取的数据, 建筑负荷可以按照下述公式进行计算。

$$Q_{\text{building}} = c \cdot G \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中: Q_{building} 为建筑负荷, kW; c 为水的比热容, 4.19kJ/(kg·K); G 为冷冻水流量, kg/s; ΔT 为冷冻水供回水温差, K。

2 空调系统运行工况分类

2.1 冷负荷影响因素分析

运行工况分类的前提需要明确输入参数和输出参数, 而冷负荷决定了建筑的供冷需求, 最终影响中央空调系统的能耗, 因此将冷负荷确定为输出参数, 冷负荷主要影响因素为输入参数。

影响建筑冷负荷的因素主要包含室外气象参数, 比如室外温度、湿度、风向、风速、云量等室外扰量^[16]。本研究对上述因素和建筑负荷进行皮尔逊相关性分析, 计算公式如式 (2) 所示^[17]。

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: r_p 为皮尔逊相关系数; m 为影响因素个数; X 为影响因素; \bar{X} 为 X 的平均值; Y 为冷负荷; \bar{Y} 为 Y 的平均值。其中相关系数 r_p 范围在[-1,1]之间, 其绝对值越大则表示相关系数越强, 可以根据表 2 进行变量相关程度判断。

计算出各因素的皮尔逊相关系数如表 3 所示, 结合表 2 可以看出室外干球温度与建筑负荷有较

强的相关性, 室外相对湿度与负荷呈现出中等程度相关, 其余参数与负荷均呈现极弱相关或无相关的现象。因此可以将室外干球温度和室外相对湿度作为负荷的主要影响因素。

表 2 变量相关程度判断

Table 2 Judgment of the degree of correlation of variables

$ r_p $	相关程度
0.8—1.0	极强相关
0.6—0.8	强相关
0.4—0.6	中等程度相关
0.2—0.4	弱相关
0.0—0.2	极弱相关或无相关

表 3 各因素间相关系数

Table 3 Correlation coefficient between factors

参数名称	冷负荷
室外干球温度	0.712
室外相对湿度	0.56
风向	0.03
风速	0.07
云量	0.13

除此之外, 由于建筑的蓄热性, 室内热量不能及时排出, 在周一至周五工作日期间出现冷负荷需求逐日增大的现象, 如图 3 所示, 图中数据记录期间室外气象参数基本相同、室外气象条件一致, 且该时间段内主机出水温度和水泵频率均未调整。因此也可以将工作日日期周一—周五视为负荷主要影响因素。

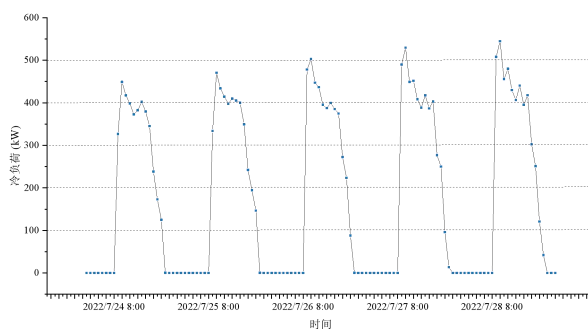


图 3 一周冷负荷波动情况

Fig.3 Weekly fluctuations in cooling loads

2.2 决策树算法简介

决策树 CART (Classification and Regression Tree) 算法作为一种监督学习的非参数模型, 常用

于处理分类和回归的问题。该算法拓扑结构如图 4 所示，首先给定输入、输出参数，算法将输入参数作为根节点，并依据输出参数将根节点拆分为可以代表模型数据特征和决策准则的内部节点，最终内部节点又被拆分为叶子节点，代表最终的决策分类结果[18]。

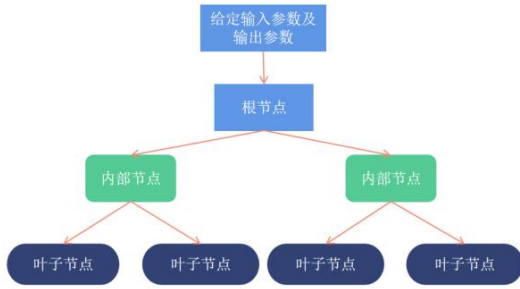


图 4 决策树拓扑结构

Fig.4 The topology of decision tree

算法主要实现流程如下[19]：

(1) 给定输入数据集 x ，即 2.1 节中确定的负荷主要影响因素，包括室外干球温度、室外相对湿度以及工作日日期周一—周五（用数值 1—5 代替）；

(2) 给定输出数据集 o ，即建筑冷负荷；

(3) 将输入数据集中各输入参数 x 排序，递归将输入空间划分为两个子区域 $R_1(j,s)$ 和 $R_2(j,s)$ ，其中 j 为切分变量， s 为切分点；其次统计出每个子区域内数据集个数 N_n ($n=1$ 或 2)，并对每个区域上平均值 c_n 求解；

$$R_1(j,s) = \{x | x_{(j)} \leq s\} \quad (3)$$

$$R_2(j,s) = \{x | x_{(j)} > s\} \quad (4)$$

$$c_n = \frac{1}{N_n} \sum_{x \in R_n(j,s)} o_i \quad (5)$$

(4) 以两区域中分类结果的误差平方和 P 值的最小值为目标，使用公式 (6) 确定出根节点以及叶子结点中最优切分变量 j 以及切分点 s ；

$$P_{\min} = \min_{j,s} [\min_{c_1} \sum_{x_i \in R_1(j,s)} (o_i - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{x_i \in R_2(j,s)} (o_i - c_2)^2] \quad (6)$$

(5) 最终将数据集划分多个区域，生成决策树回归模型。

2.3 分类结果

根据上述分析，编写决策树回归算法对负荷进行分类，分类结果拓扑结构如图 5 所示，运行工况

共分为 7 类，在表 4 中整理出详细分类结果，可以看出，分类工况中剔除了室外相对湿度这一参数，这是由于室外相对湿度与室外温度之间相关系数在 0.9 左右，相关程度较高，因此算法中仅保留了室外温度和工作日日期两个特征。

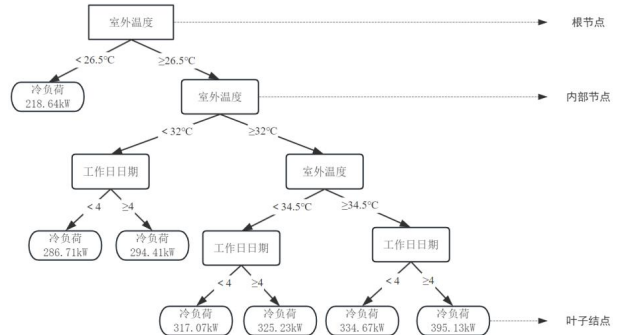


图 5 决策树算法分类结果拓扑结构

Fig.5 The topology of classification result based on the decision tree

表 4 夏季分类结果

Table 4 The classification results in summer

类别	工况	冷负荷均值/kW
1	室外温度 < 26.5°C	218.64
2	室外温度 [26.5°C, 32°C)，工作日日期周一—周三	286.71
3	室外温度 [32°C, 34.5°C)，工作日日期周一—周三	317.07
4	室外温度 [26.5°C, 32°C)，工作日日期周四—周五	294.41
5	室外温度 [32°C, 34.5°C)，工作日日期周四—周五	325.23
6	室外温度 ≥ 34.5°C，工作日日期周一—周三	334.67
7	室外温度 ≥ 34.5°C，工作日日期周四—周五	395.13

2.4 确定最佳主机出水温度和水泵频率

由于冷冻水系统各设备能耗之间互相耦合，本研究将整个中央系统运行能效比 COP_{sys} 为衡量指标对主机出水温度和水泵频率进行寻优。系统能效比按照公式 (7)、(8) 进行计算。

$$COP_{sys} = \frac{Q_{building}}{P_{sys}} \quad (7)$$

$$P_{sys} = P_{chiller} + P_{pump} + P_{FCU} \quad (8)$$

式中: COP_{sys} 为空调系统能效比; P_{sys} 为空调系统总能耗, kWh, 包括主机能耗 $P_{chiller}$ 、冷冻水泵能耗 P_{pump} 以及末端能耗 P_{FCU} 。

根据上述分类结果筛选出 COP_{sys} 分布情况, 从而统计出每种类别下 COP_{sys} 最大值以及其对应的主机设定温度与水泵设定频率, 作为该类别下优化的设定参数, 如图 6 所示。以第二类运行工况为例, 其最高系统能效比为 3.27, 分类条件下对应的主机设定出水温度和水泵频率分别为 13℃、30Hz。其余工况下最佳设定参数如表 5 所示。

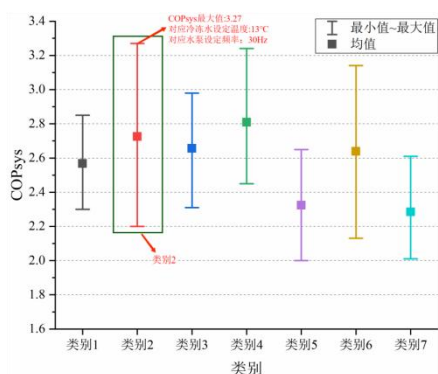


图 6 夏季空调系统 COP_{sys} 分布

Fig.6 COP_{sys} distribution of air-conditioning systems in summer

表 5 夏季供冷不同工况对应最优出水温度和水泵频率

Table 5 Optimal water temperature and pump frequency for different working conditions in summer cooling

类别	COP_{sys} 最大值	对应出水温度/℃	对应水泵频率/Hz
1	2.85	15	30
2	3.27	13	30
3	2.98	13	40
4	3.24	13	30
5	2.63	13	40
6	3.14	12	35
7	2.61	12	40

3 节能性分析

为了验证优化前后中央空调系统运行性能, 将上述运行策略应用到实验中进行节能性分析, 并选用 2021 年 (优化前) 与 2022 年 (优化后) 两个年度中共 10 天的实际运行数据进行对比, 详细对比结果如表 6 所示, 可以发现在 10 组对比工况下优化前后日平均室外气象参数基本一致的前提下, 优化后空调系统总运行能耗有明显降低, 每组工况节

能率在 30%左右, 总体而言, 在该时段内夏季空调系统总能耗共降低 33%左右。

表 6 优化前后对比结果

Table 6 Comparison of energy consumption before and after optimization

对比数据	2021 年度 (优化前)			2022 年度 (优化后)			节能率 /%
	室外干球温度 /℃	室外相对湿度 /%	空调系统总能耗 /kWh	室外干球温度 /℃	室外相对湿度 /%	空调系统总能耗 /kWh	
1	26.74	45.08	1737.98	27.50	51.08	1117.37	35.71
2	26.52	70.81	1555.3	26.16	66.11	1088.4	30.02
3	29.38	62.03	1968.97	28.75	65.43	1311.28	33.40
4	32.13	49.32	2523.87	32.44	43.92	1590.09	37.00
5	31.17	51.92	2097.3	30.44	43.92	1483.29	29.28
6	32.84	43.66	2531.08	33.67	45.76	1685.46	33.41
7	32.20	43.00	2466.48	31.78	45.20	1498.69	39.24
8	37.18	55.74	2702.68	36.89	51.04	1896.89	29.81
9	24.76	48.45	1454.58	25.42	58.45	973.7	33.06
10	26.91	65.58	1524.49	26.43	58.38	1093.49	28.27

同时图 7 中统计出优化后 10 日内的各楼层平均室内温湿度数据, 可以发现室内温度均在 27℃ 温度以内, 湿度均保持在 70%以内, 满足设计要求以及室内人体热舒适要求, 表明该中央空调冷冻水系统优化策略优化成果显著。

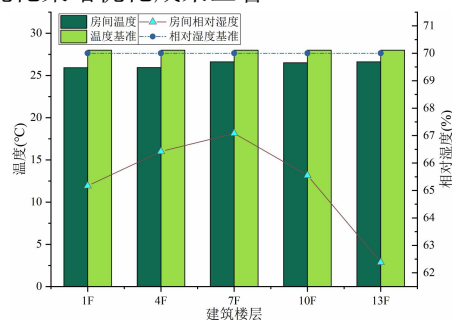


图 7 优化后室内温湿度

Fig.7 Optimized room temperature and relative humidity

4 结论

本文针对四川省某办公建筑, 以中央空调冷冻水系统为研究对象, 分析了建筑负荷的主要影响因素, 并采用决策树回归算法对中央空调系统夏季运行模式进行分类, 优化出每组工况下主机设定温度和水泵设定频率。本研究得出的主要结论如下:

(1) 根据建筑负荷的周期性变化以及建筑蓄热特性, 结合相关性分析, 确定出负荷主要影响因素为室外干球温度、室外相对湿度以及工作日日期。

(2) 将建筑主要影响因素作为输入参数, 建筑负荷作为输出参数编写决策树回归算法, 对中央空调系统运行工况进行分类, 分别分为 7 种工况; 根据分类结果对每种工况下的 COP_{sys} 进行筛选, 找出了每组类别下 COP_{sys} 较高值以及其相对应的主机出水温度和水泵设定频率, 作为该工况下的优化设定参数。

(3) 为了验证空调冷冻水系统优化效果, 将优化策略应用到实际系统中, 并选取了 10 天供冷工况运行数据对空调系统能耗进行对比分析, 结果表明在室外气象参数基本一致的情况下, 空调系统可节约 33% 左右的电量, 且可以满足室内舒适度要求, 优化成果较为显著。

参考文献:

- [1] Wang X, Liu K, You W, et al. Stepwise Optimization Method of Group Control Strategy Applied to Chiller Room in Cooling Season[J]. *Buildings*, 2023,13(2):487.
- [2] Jradi M, Veje C, Jørgensen B N. Deep energy renovation of the Mærsk office building in Denmark using a holistic design approach[J]. *Energy and buildings*, 2017,151: 306-319.
- [3] Li B, You L, Zheng M, et al. Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural China[J]. *Energy and Built Environment*, 2020,1(3):327-336.
- [4] Zhou C, Fang Z, Xu X, et al. Using long short-term memory networks to predict energy consumption of air-conditioning systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,55:102000.
- [5] Yang S, Yu J, Gao Z, et al. Energy-saving optimization of air-conditioning water system based on data-driven and improved parallel artificial immune system algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023,283:116902.
- [6] Jiang Y, Liu X, Zhang L, et al. High Temperature Cooling and Low Temperature Heating in Buildings of EBC Annex 59[J]. *Energy Procedia*, 2015,78:2433-2438.
- [7] Thu K, Saththasivam J, Saha B B, et al. Experimental investigation of a mechanical vapour compression chiller at elevated chilled water temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017,123:226-233.
- [8] Ukai M, Tanaka H. A case study of a pilot system with gas-engine heat pumps and a desiccant air handling system using higher chilled water temperature in Japan[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022,201: 117817.
- [9] 陈峰,刘金祥,李沁,等.变流量冷冻水系统温差控制法的适用性[J].*土木建筑与环境工程*,2015(3):94-101.
- [10] 王佳明,赵天怡,沈丹丹,等.变流量空调水系统管网热力动态响应特性[J].*暖通空调*,2023,53(8):31-39.
- [11] 连之伟.热质交换原理与设备(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2011:180-185.
- [12] Sun Y, Xue H, Wang W, et al. Development of an optimal control method of chilled water temperature for constant-speed air-cooled water chiller air conditioning systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020,180:115802.
- [13] 曲继晓.基于负荷预测的变流量空调系统节能研究[D].济南:山东建筑大学,2017.
- [14] Lee K, Cheng T. A simulation-optimization approach for energy efficiency of chilled water system[J]. *Energy and Buildings*, 2012,54:290-296.
- [15] Shao L, Yang L, Zhao L, et al. Hybrid steady-state modeling of a residential air-conditioner system using neural network component models[J]. *Energy and Buildings*, 2012,50:189-195.
- [16] 贾广政.公共建筑空调负荷预测及制冷站控制策略研究[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [17] Lv R, Yuan Z, Lei B, et al. Building thermal load prediction using deep learning method considering time-shifting correlation in feature variables[J]. *Journal of Building Engineering*. 2022,61:105316.
- [18] Balogun A, Tella A. Modelling and investigating the impacts of climatic variables on ozone concentration in Malaysia using correlation analysis with random forest, decision tree regression, linear regression, and support vector regression[J]. *Chemosphere*. 2022,299:134250.
- [19] 李航.统计学习方法(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2019:80-85.